

VŠB – Technická univerzita Ostrava  
Fakulta strojní  
Katedra obrábění, montáže a strojírenské metrologie

**Měření a analýza povrchů vytvořených technologií  
vysokorychlostního abrazivního vodního paprsku ve vztahu  
k obrobitelnosti materiálu**

Measurement and Analysis of Surfaces Created by High-Speed  
Abrasive Water Jet Technology in Relation to the Machinability  
of the Material

Student:

Matěj Pitron

Vedoucí bakalářské práce:

Ing. Dagmar Klichová, Ph.D.

Ostrava 2018

## Zadání bakalářské práce

Student: **Matěj Pitron**  
Studijní program: B2341 Strojírenství  
Studijní obor: 2303R002 Strojírenská technologie  
Téma: Měření a analýza povrchů vytvořených technologií vysokorychlostního  
abrazivního vodního paprsku ve vztahu k obrobitelnosti materiálu  
Measurement and Analysis of Surfaces Created by High-speed Abrasive  
Water Jet Technology in Relation to the Machinability of the Material

Jazyk vypracování: čeština

Zásady pro vypracování:

1. Studium základní literatury a tvorba rešerše.
2. Popis technologie vysokorychlostního abrazivního vodního paprsku.
3. Metody měření zkoumaných povrchů.
4. Analýza a interpretace naměřených dat.
5. Závěr.

Seznam doporučené odborné literatury:

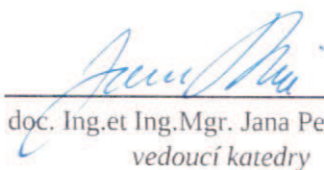
ČEP, R.; BRYCHTA, J.; SADÍLEK, M.; NOVÁKOVÁ, J.; PETŘKOVSKÁ, L. *Nové směry v progresivním obrábění*. Ostrava: VŠB-TU Ostrava, 2007. s. 251. ISBN 978-80-248-1505-3.  
SUMMERS, D. A. *Waterjetting Technology*. E & FN Spon, Chapman & Hall, London 1995. ISBN 0-419-19660-9.  
LABUS, T. J. (ed.). *Fluid Jet Technology – Fundamentals and Applications*. WJTA, St. Louis 1995. ISBN 1-880342-01-4.  
Série sborníků International Conference on Water Jetting, BHR Group.  
Série sborníků konferencí Water Jet Technology Association, WJTA.

Formální náležitosti a rozsah bakalářské práce stanoví pokyny pro vypracování zveřejněné na webových stránkách fakulty.


Vedoucí bakalářské práce: **Ing. Dagmar Klichová**

Datum zadání: 08.12.2017

Datum odevzdání: 21.05.2018

  
doc. Ing. et Ing. Mgr. Jana Petrů, Ph.D.  
vedoucí katedry



  
doc. Ing. Ivo Hlavatý, Ph.D.  
děkan fakulty

### Místopřísežné prohlášení studenta

Prohlašuji, že jsem celou bakalářskou práci včetně příloh vypracoval samostatně pod vedením vedoucího bakalářské práce a uvedl jsem všechny použité podklady a literaturu.

V Ostravě dne: 20. 5. 2018

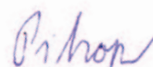


podpis studenta

## Prohlašuji, že

- jsem byl seznámen s tím, že na moji bakalářskou práci se plně vztahuje zákon č. 121/2000 Sb., autorský zákon, zejména § 35 – užití díla v rámci občanských a náboženských obřadů, v rámci školních představení a užití díla školního a § 60 – školní dílo.
- беру на ве́доміі, že Vysoká škola báňská – Technická univerzita Ostrava (dále jen „VŠB-TUO“) má právo nevýdělečně ke své vnitřní potřebě bakalářskou práci užít (§ 35 odst. 3).
- souhlasím s tím, že bakalářská práce bude v elektronické podobě uložena v Ústřední knihovně VŠB-TUO k nahlédnutí a jeden výtisk bude uložena vedoucího bakalářské práce. Souhlasím s tím, že údaje o kvalifikační práci budou zveřejněny v informačním systému VŠB-TUO.
- bylo sjednáno, že s VŠB-TUO, v případě zájmu z její strany, uzavřu licenční smlouvu s oprávněním užít dílo v rozsahu § 12 odst. 4 autorského zákona.
- bylo sjednáno, že užít své dílo – bakalářskou práci nebo poskytnout licenci k jejímu využití mohu jen se souhlasem VŠB-TUO, která je oprávněna v takovém případě ode mne požadovat přiměřený příspěvek na úhradu nákladů, které byly VŠB-TUO na vytvoření díla vynaloženy (až do jejich skutečné výše).
- беру на ве́доміі, že odevzdáním své práce souhlasím se zveřejněním své práce podle zákona č. 111/1998 Sb., o vysokých školách a o změně a doplnění dalších zákonů (zákon o vysokých školách), ve znění pozdějších předpisů, bez ohledu na výsledek její obhajoby.

V Ostravě dne: 20. 5. 2018



podpis

Jméno a příjmení autora práce: Matěj Pitron

Adresa trvalého pobytu autora práce: Rudná 792/50, Ostrava-Vítkovice

## ANOTACE BAKALÁŘSKÉ PRÁCE

PITRON, M. Měření a analýza povrchů vytvořených technologií vysokorychlostního abrazivního vodního paprsku ve vztahu k obrobiteľnosti materiálu: *bakalářská práce*. Ostrava: VŠB – Technická univerzita Ostrava, Fakulta strojní, Katedra obrábění, montáže a strojírenské metrologie, 2018, 45 s. Vedoucí práce: Ing. Dagmar Klichová, Ph.D.

Předkládaná práce se zabývá obrobiteľností materiálů technologií vysokorychlostního vodního paprsku (AWJ – Abrasive Water Jet). Úvod rešeršní části bakalářské práce se zabývá shrnutím informací o obrábění vysokorychlostním vodním paprskem. Další část je věnována postupům výpočtů obrobiteľnosti materiálů. V experimentální části bakalářské práce je stanovena obrobiteľnost materiálů technologií abrazivního vodního paprsku u vybraných vzorků.

## ANNOTATION OF BACHELOR THESIS

PITRON, M. Measurement and Analysis of Surfaces Created by High-Speed Abrasive Water Jet Technology in Relation to the Machinability of the Material: *Bachelor Thesis*. Ostrava: VŠB – Technical University of Ostrava, Faculty of Mechanical Engineering, Department of Machining, Assembly and Engineering Metrology, 2018, 45 p. Thesis supervisor: Ing. Dagmar Klichová, Ph.D.

Presented thesis is focused the machinability of materials using high speed water jet technology (AWJ – Abrasive Water Jet). Introduction of the research part of the bachelor thesis deals with summarizing information about high speed water jet cutting. Another part is devoted to calculations of machinability of the materials. In the experimental part of the bachelor thesis is determined the machinability of the materials of the abrasive water jet technology in selected samples.

### **Poděkování**

Rád bych touto cestou poděkoval své vedoucí bakalářské práce Ing. Dagmar Klichové, PhD. za poskytnutí cenných informací a rad, při tvorbě této bakalářské práce.

## Obsah

<b>Seznam použitých symbolů a zkratk</b> .....	<b>9</b>
<b>Úvod</b> .....	<b>10</b>
<b>1 Cíl bakalářské práce</b> .....	<b>11</b>
<b>2 Rozdělení vodních paprsků</b> .....	<b>12</b>
2.1 Kontinuální vodní paprsek .....	12
2.1.1 Vodní paprsek .....	13
2.1.2 Abrazivní vodní paprsek .....	13
2.1.3 Abrazivní suspenzní paprsek .....	13
2.1.4 Kryogenní vodní paprsek .....	13
2.2 Pulzující vodní paprsky .....	14
2.2.1 Jednotlivé pulzy nebo pulzy s nízkou frekvencí .....	14
2.2.2 Přerušované paprsky .....	15
2.2.3 Modulované paprsky .....	15
<b>3 Technologie abrazivního vodního paprsku</b> .....	<b>16</b>
3.1 Formování abrazivního vodního paprsku .....	16
3.1.1 Kapalina .....	16
3.1.2 Úprava a filtrace kapaliny .....	17
3.1.3 Komprese .....	17
3.1.4 Rozvod stlačené kapaliny .....	17
3.1.5 Vodní tryska .....	18
3.1.6 Směšovací komora .....	18
3.1.7 Zaostřovací trubice .....	19
3.2 Abrazivo .....	20
3.3 Obrobitelnost materiálu .....	20
3.4 Kvalita povrchu .....	21
3.5 Postup zkoušky obrobitelnosti u hybroabrazivního dělení .....	22

---

<b>4 Experimentální část .....</b>	<b>24</b>
4.1 Nastavení experimentu .....	24
4.2 Vlastnosti zkoumaných materiálů .....	25
4.2.1 Inconel 600 .....	25
4.2.2 Nástrojová ocel .....	26
4.2.3 Nerezová ocel .....	27
4.2.4 Měď .....	28
4.2.5 Mosaz .....	29
4.2.6 Hliník .....	29
4.3 Postup výpočtu .....	30
4.4 Diskuze a výsledky .....	32
<b>5. Závěr.....</b>	<b>35</b>
<b>6. Literatura.....</b>	<b>36</b>
<b>7. Přílohy .....</b>	<b>39</b>



## Seznam použitých symbolů a zkratek

$m$	hmotnost vzorku	[kg]
$\Delta m$	hmotnostní úběr materiálu	[kg]
$m_a$	hmotnostní průtok abraziva	[g·min <sup>-1</sup> ]
$V$	objem vzorku	[mm <sup>3</sup> ]
$\Delta V$	objemový úběr materiálu	[mm <sup>3</sup> ]
$\Delta V_U$	jednotkový objemový úběr materiálu	[mm <sup>3</sup> ]
$\Delta V_{Uet}$	jednotkový objemový úběr etalonového materiálu	[mm <sup>3</sup> ]
$L$	délka drážky	[mm]
$\rho$	hustota materiálu	[kg·m <sup>-3</sup> ]
$M_I$	index obrobiteľnosti materiálu	[-]
$p$	tlak kapaliny	[MPa]
$v$	rychlost posuvu	[mm·s <sup>-1</sup> ]
$q$	stupeň kvality povrchu	[-]
$Rm$	pevnost v tahu	[MPa]
$Rp$	mez kluzu	[MPa]
$A$	prodloužení materiálu	[%]
$\varphi$	úhel dopadu	[°]

<b>AV ČR</b>	Akademie věd České republiky
<b>ASJ</b>	AbrasiveWaterSuspension Jet – abrazivní suspenzní paprsek
<b>AWJ</b>	AbrasiveWater Jet – abrazivní vodní paprsek
<b>ÚGN</b>	Ústav geoniky
<b>WJ</b>	Water Jet – vodní paprsek

## Úvod

Z důvodu sílícího tlaku na ochranu životního prostředí v kombinaci se vznikem odolnějších a pevnějších materiálů dochází k vývoji nových kvalitnějších technologií sloužících k obrábění materiálů. Mezi tyto technologie jde zařadit i technologie vodního paprsku a abrazivního vodního paprsku. Pro svou ekologičnost, nízkou finanční náročnost, a hlavně širokému spektru materiálů, jenž lze těmito technologiemi obrábět materiály jako je papír, plast, horniny, kompozitní materiály, kovy aj. má velikou uplatnitelnost.

Vzhledem k využití vody jako média, v případě metody AWJ, v kombinaci s abrazivem se jedná o technologii, při které vzniká studený řez, díky němuž nedochází k tepelnému ohřevu okolí obráběného materiálu na rozdíl od běžných konvenčně využívaných technologií. Dále díky nízkým řezným silám nedochází k vzniku vnitřního pnutí typického pro ostatní běžné technologie.

Vysoká dělicí účinnost této technologie je však doprovázena vznikem typického povrchu, vyznačujícího se svou odlišností v celém průběhu řezu. Možností, jak se tomuto jevu vyhnout, jelikož je v praktickém využití nežádoucí je hledání optimálního nastavení technologických podmínek.

# **1 Cíl bakalářské práce**

Tato bakalářská práce se zabývá obrobíitelností různých materiálů technologií abrazivního vodního paprsku.

Cílem bakalářské práce je experimentální zjištění obrobíitelnosti materiálů metodou technologie abrazivního vodního paprsku, následného vyhodnocení a srovnání zjištěných dat.

## **Etapy vedoucí k cíli bakalářské práce:**

1. Studium základní literatury a tvorba rešerše.
2. Popis technologie vysokorychlostního abrazivního vodního paprsku.
3. Metody měření zkoumaných povrchů.
4. Analýza a interpretace naměřených dat.
5. Závěr.

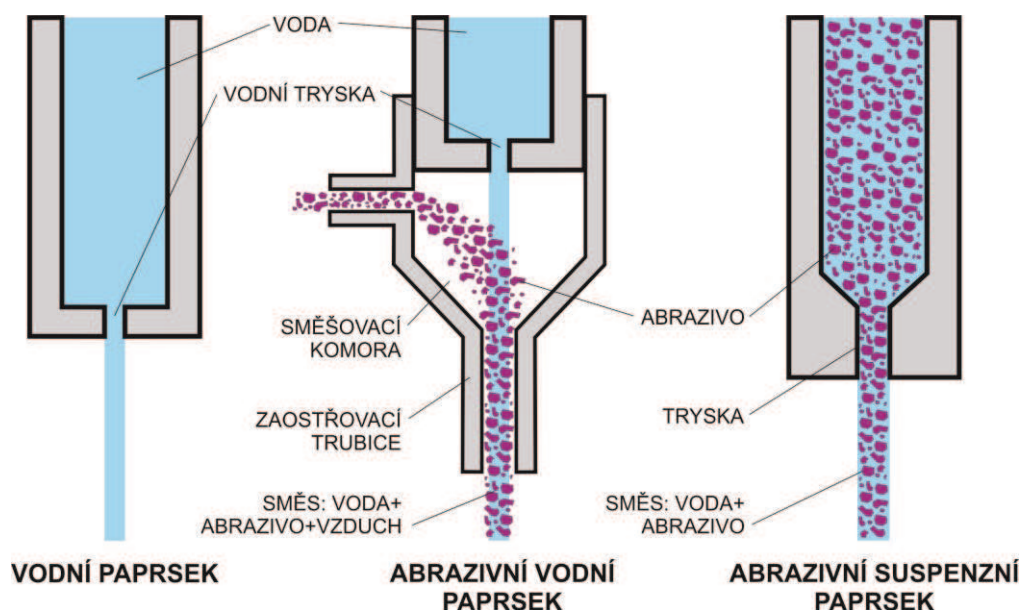
## 2 Rozdělení vodních paprsků

Chemické a mechanické vlastnosti vody poskytují různé možnosti jejího využití. Technologie využívající vodu jako řezný nástroj poskytují vhodnou alternativu ke konvenčním technologiím. Ve spojení s různými modifikacemi vodního paprsku a technologické sestavy je možné využít vodu jako řezný nástroj pro široké spektrum materiálů.

Vodní paprsky můžeme dělit pomocí několika kategorií. Jednou z možností je dělení v závislosti, zda paprsek obsahuje abrazivní prvky. V tomto případě dělíme paprsky na čisté nebo abrazivní. Dalším kritériem pro rozdělení vodních paprsků je jejich přetržitost působení v čase na kontinuální nebo pulzující paprsky. [1]

### 2.1 Kontinuální vodní paprsek

Nejběžnějším typem paprsku je kontinuální vodní paprsek, který je tvořen proudem kapaliny, nejčastěji vody, jenž má při výstupu z trubice velmi vysokou rychlost. Kontinuální vodní paprsek dělíme v závislosti na obsahu příměsí na vodní paprsek (WJ – Water Jet), je-li paprsek bez příměsí. Naopak, obsahuje-li paprsek abrazivní částice, mluvíme o abrazivním vodním paprsku (AWJ – Abrasive Water Jet) nebo abrazivním suspenzním paprsku (ASJ – Abrasive Suspension Jet). [1]



Obr. 1 Srovnání paprsků [5]

### 2.1.1 Vodní paprsek

Vodní paprsek dosahující až trojnásobku rychlosti zvuku a vysokou kinetickou energií vzniká pomocí generování vysokého tlaku vody a následném průchodu kapaliny tryskou o malém průměru. Vznik vodního paprsku je schematicky vyobrazen na Obr. 1. Působením tlaku kapaliny na plochu obráběného materiálu, dochází k jeho postupnému odstraňování a destrukci. Paprsek v závislosti na čase a hloubce řezu ztrácí postupně svou kinetickou energii, čímž dochází k jeho zakřivení. Generovaný tlak kapaliny se pohybuje v rozmezí 60 MPa až 600 MPa. Volbu velikosti pracovního tlaku ovlivňuje typ obráběného materiálu. Tvrdost a tloušťka materiálu velmi ovlivňuje účinnost vodního paprsku. Čím tvrdší nebo hrubší materiál, tím je účinnost nižší. Proto se čistý vodní paprsek používá k řezání tenkých nebo měkkých materiálů jako je například papír, plast, tenké plechy nebo potraviny. [1], [2]

### 2.1.2 Abrazivní vodní paprsek

Do vodního paprsku jsou přimíchány abrazivní částice, tím vznikne abrazivní vodní paprsek, jenž má několikanásobně vyšší účinnost. Jeho vznik je zobrazen na Obr. 1. Tato technologie bude podrobněji popsána v samostatné kapitole.

### 2.1.3 Abrazivní suspenzní paprsek

Rozdílem mezi technologií ASJ a AWJ je postup přimíchávání abrazivních částic. Zatímco u technologie AWJ je abrazivo přimícháno ve směšovací komoře do vysokorychlostního paprsku, u technologie ASJ je abrazivo smícháno s vodou, a až následně je tato suspenze vedena vysokým tlakem do speciální trysky, jak je vidět na Obr. 1. [10]

### 2.1.4 Kryogenní vodní paprsek

U technologie kryogenního vodního paprsku slouží jako abrazivo ledové částice. Ty mohou vzniknout podchlazením kapaliny na  $-20^{\circ}\text{C}$ . Další možností je vstříknutí chladicího média do kapaliny při vzniku vysokorychlostního paprsku. Ledové částice lze vyrobit ve speciálním zařízení při velmi nízké teplotě ( $-195,8^{\circ}\text{C}$ ). [11] Tyto ledové částice jsou posléze přidány do vodního paprsku.

## 2.2 Pulzující vodní paprsky

Pulzující vodní paprsky (PWJ – Pulsating Water Jet) jsou technologií pracující na principu přetržitých paprsků při nízkých tlacích. Výhodou pulzujících vodních paprsků je využití impaktního tlaku, který je několikanásobně vyšší než stagnační tlak. Pomocí impaktního tlaku v materiálu dochází k vyšším erozním účinkům, než jakých lze dosáhnout při běžných kontinuálních paprscích. [12], [13] Způsob generování pulzů rozděluje pulzující vodní paprsky na jednotlivé pulzy nebo pulzy s nízkou frekvencí, přerušované paprsky a paprsky modulované. [12]

### 2.2.1 Jednotlivé pulzy nebo pulzy s nízkou frekvencí.

Princip pulzujícího vodního paprsku s jednotlivými pulzy je založen na dopadu sloupce vody vytvořeným jedním pulzem a tím vytvoření tlaku na materiál. Tento tlak po odeznění dopadu klesá na nulu. Frekvence dopadu jednotlivých pulzů je závislá na způsobů jejich generování. Vzdálenost trysky od povrchu materiálu není v tomto vůbec rozhodující. [12] Ke generování pulzujících paprsků jednotlivých pulzů nebo pulzů s nízkou frekvencí slouží různé typy zařízení. Může se jednat o nárazová zařízení s volným pístem, kde píst naráží do sloupce kapaliny a tím dochází ke vzniku pulzujícího vodního paprsku. K vytvoření vysoké frekvence pístů dochází pomocí mechanických impaktorů nebo střel. Paprsek se však vyznačuje vysokým statickým tlakem a krátkým trváním pulzu, čímž se velmi snižuje jeho účinnost. [14] Dalším zařízením sloužícím ke generování pulzujícího vodního paprsku je zařízení vytlačující pulzy tlakem. Tyto zařízení na rozdíl od zařízení s volným pístem mají vyšší účinnost (až 90%). Dále je u nich výhodou delší doba trvání pulzujícího paprsku a velký objem kapaliny, která je obsažena v samotném pulzu. K tvorbě pulzu se využívá stlačený vzduch, jenž slouží k pohánění nízkotlakého pístu. Ten je přímo spojen s vysokotlakým pístem o mnohem menším průměru, který stlačuje vodu a zároveň ji vytlačuje skrze trysku ven. Dále je možné využít hydraulického generátoru pulzací, který vytváří pulzující vodní paprsek tak, že kapalina, která se nachází ve vysokotlaké nádobě je stlačena na vysoký tlak, je otevřen rychlostní ventil, čímž dochází ke vzniku sloupce kapaliny s velmi vysokou kinetickou energií. [15]

### 2.2.2 Přerušované paprsky

Způsob vzniku přerušovaného vodního paprsku je založen na principu rozdělení kontinuálního vodního paprsku pomocí přerušovače hned po výstupu z trysky na jednotlivé sloupce vody. Jedním ze způsobů jak přerušit kontinuální vodní paprsek je možnost využití rotujícího kotouče s otvory. Tento cyklus pulzujícího vodního paprsku je opakován s frekvencí odpovídající přerušování paprsku. Hlavní nevýhodou této metody vzniku pulzujícího vodního paprsku je jeho nízká účinnost z důvodu ztráty částí energie způsobenou průchodem paprsku přerušovačem. [12]

### 2.2.3 Modulované paprsky

Zařízení sloužící ke generování modulovaných vodních paprsků jsou vnitřní mechanické modulátory, ultrazvukové modulátory nebo rezonátory. [12] Rozdílem mezi modulovanými paprsky a paprsky vytvořenými předchozími metodami je, že modulované paprsky mají proměnnou rychlost sloupce vody, zatímco předchozí metody vytvářeli sloupce s konstantní rychlostí. U modulovaných paprsků vystupuje kapalina jako kontinuální paprsek a do samotného pulzu se transformuje až v určité vzdálenosti od trysky. Proměnná rychlost kontinuálního paprsku vystupujícího z trysky je způsobená tlakovými pulzacemi před tryskou. Rychlejší části paprsku dostihnou pomalejší v určité vzdálenosti po výstupu z trysky a kontinuální paprsek se tímto rozdělí na jednotlivé pulzy. Paprsek o vysoké rychlosti při dopadu na povrch materiálu vytváří tlak, který se postupně snižuje a po dopadu celého sloupce kapaliny je následně nulový. Takto periodicky vytvářený tlak na povrch materiálů zvyšuje mnohonásobně efektivnost vodního paprsku, oproti vodnímu paprsku využívajícímu kontinuální sloupec kapaliny. [16]

### 3 Technologie abrazivního vodního paprsku

Odebírání materiálu pomocí technologie AWJ a WJ spočívá ve vytvoření vysokého tlaku kapaliny, která pomocí průtoku tryskou dosahuje velké kinetické energie. Aby se zvýšila efektivita samotné technologie, je přidáváno do vysokotlakého vodního paprsku abrazivo. (viz. Obr. 2)

#### 3.1 Formování abrazivního vodního paprsku

##### 3.1.1 Kapalina

Jedním ze základních faktorů ovlivňující efektivnost technologie AWJ je výběr pracovní kapaliny. Ta musí splňovat tyto požadavky [1]:

- nízkou viskozitu díky níž bude docházet k co nejmenším ztrátám tlaku v kapalině při průchodu hadicemi a potrubím.
- nízké náklady kapaliny a její dostupnost
- co nejmenší agresivitu vůči kovovým částem zařízení

Vzhledem k těmto požadavkům je nejobvyklejší kapalinou voda. Která splňuje požadavky, jak na dostupnost a nízkou cenu, ale i na ekologii.



Obr. 2 Formování abrazivního vodního paprsku[7]



### 3.1.2 Úprava a filtrace kapaliny

Aby byl chod zařízení dlouhodobý, je důležité kapalinu dobře filtrovat. Opotřebení všech částí zařízení se zrychluje, jestliže se ve vodě nachází nečistoty. Nečistoty ve vodě způsobují opotřebení trysek, těsnění, stěn válců, atd. Což následně vyžaduje vyšší počet oprav. Ke snížení nepříznivého vlivu vody na zařízení dochází dále k změkčování a deionizaci kapaliny.

### 3.1.3 Komprese

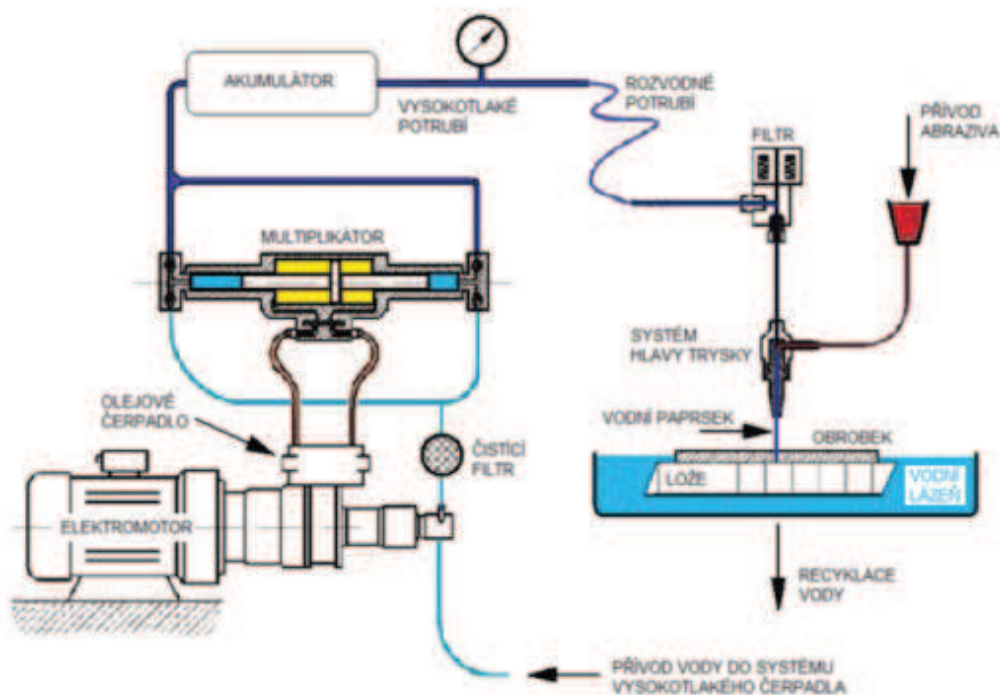
Účinnost působení vodního paprsku na materiál je závislý na velikosti tlaku kapaliny, jenž působí na obráběnou plochu. Tlakový systém zařízení plynule generuje stlačenou kapalinu s konstantní efektivní hodnotou tlaku. Ke generování vysokotlakého vodního paprsku se v rámci technologie AWJ využívají dva druhy zařízení.

Prvním je zařízení s plunžrem, které je schopné vyvinout pracovní tlak mezi 100 až 400 MPa. Lze ho tedy použít i v aplikaci řezání materiálu. Čerpadlo je však často využíváno na čištění povrchů a odstraňování starých nátěrů. [3]

Druhým je zařízení s multiplikátorem. Toto čerpadlo je schopno vyvinout tlak vody mezi 400 až 600 MPa, některá speciální zařízení jsou schopná dosáhnout tlaku až 1000 MPa. Hydraulický multiplikátor pracuje na principu působení rovnováhy sil na nestejně plochy diferenciálního pístu. Rozdíly pracovních ploch vysokotlakého a nízkotlakého pístu se využívají ke změně parametrů tlakové energie. [3] Princip využití zařízení s multiplikátorem je schematicky zobrazen na Obr. 3.

### 3.1.4 Rozvod stlačené kapaliny

Pomocí vysokotlakého potrubí je stlačená voda přepravována do kompenzátoru, který slouží k vyrušení kolísání tlaku vody způsobené čerpadlem. [1] Kapalina se přes vysokotlaké hadice nebo přes tlustostěnné vysokotlaké potrubí s malým průměrem přivede k polohovacímu zařízení, na němž je přidělena řezací hlava. Pro výrobu vysokotlakého potrubí se nejčastěji využívají nerezové materiály, které jsou zároveň velmi pevné. [3]



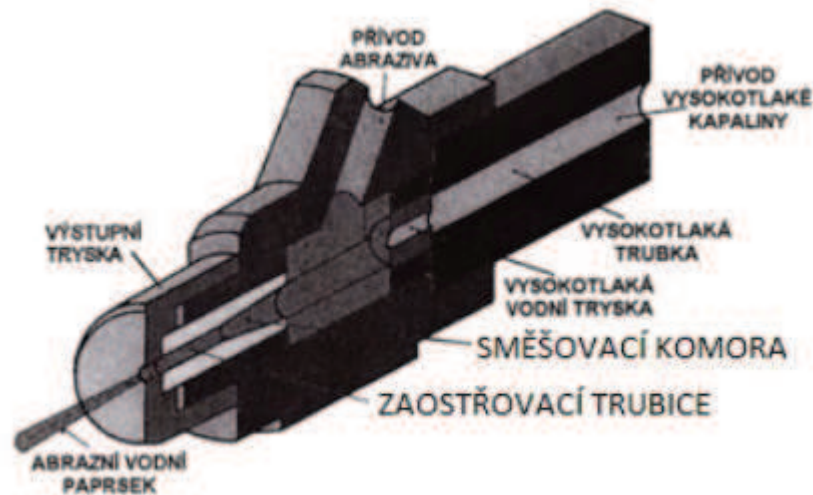
Obr. 3 Schéma přívodu kapaliny vysokotlakým čerpadlem [9]

### 3.1.5 Vodní tryska

Vodní tryska, která slouží k transformaci potenciální energie kapaliny na kinetickou energii paprsku, je umístěná v první části řezací hlavy. Jak je schematicky zobrazeno na Obr. 4. Vodní tryska usměřňuje paprsek a slouží ke zvýšení jeho rychlosti. Souvislý homogenní paprsek je základem řezného nástroje. Samotné vodní trysky se v současnosti vyrábí z diamantu, rubínu a safíru. Můžou být vyrobeny i ze speciálních ocelí, slinutých karbidů nebo keramiky. Vodní trysky z těchto materiálů se však využívají k aplikaci technologie s nižšími tlaky. [1]

### 3.1.6 Směšovací komora

Abrazivní materiál je přimícháván do vodního paprsku ve směšovací komoře, která je součástí řezací hlavy (viz. Obr. 4). Kapalina při vstupu do širšího prostoru směšovací komory přechází z laminárního proudění na turbulentní. Kapalina začne vířit a vzniká podtlak. Abrasivo je tímto podtlakem přisáváno ze zásobníku a posléze je strháváno paprskem kapaliny. Tímto procesem dojde k rovnoměrnému rozptýlení abrazivních zrn v kapalině. [1], [2]



Obr. 4 Řezací hlavice [8]

### 3.1.7 Zaostřovací trubice

Průchodem vysokorychlostní kapaliny smíšené s abrazivem přes zaostřovací trubici vzniká koherentní vodní paprsek. Vlastnosti vystupujícího paprsku ovlivňuje vnitřní průměr a délka trubice. Vnitřní průměr trubice se pohybuje od 0,8 do 2,2 mm. K prodloužení životnosti trysky, je základním požadavkem vysoká otěruvzdornost materiálu, ze kterého je trubice vyrobena. I přes tento požadavek však postupně dojde k opotřebení nástroje. Opotřebení trubice se projevuje zvýšením jejího vnitřního průměru. Životnost nástroje velmi ovlivňuje druh použitého abraziva a nastavení parametrů technologie. Zaostřovací trubice je zobrazena na Obr. 5. [1]



Obr. 5 Zaostřovací trubice [6]

### 3.2 Abrazivo

Abrazivní částice ve vysokorychlostním paprsku zvyšují jeho výkon při řezání. Proto je výběr správného abraziva velmi důležitý. Při výběru abraziva se musí zohlednit tyto faktory[4]:

- Cena abraziva – ta představuje až 50% z celkových provozních nákladů. Levnější abraziva však mají menší účinnost.
  - Tvrdost abraziva – výhodou tvrdších abraziv je jejich vyšší účinnost při řezání, nevýhodou však je rychlejší opotřebení zaostřovací trubice.
  - Velikost abrazivních zrn – při použití menších částic se dosáhne nižší drsnosti povrchu, zároveň se tím prodlouží čas řezání. Pro určení velikosti zrn se používá jednotka MESH, což představuje počet ok síta na délce jednoho palce.
  - Tvar abrazivních zrn – má vliv na drsnost povrchu a dosaženou hloubku řezu.
  - Hmotnostní tok abraziva – vyšší hmotnostní tok zvyšuje hloubku řezu. Musí se ovšem brát ohled na to, aby hmotnostní tok abraziva nepřekročil kritickou hodnotu. Při jejím překročení hloubka řezu stagnuje a může dojít i k ucpání zaostřovací trubice.
  - Ekologičnost abraziva – samotné abraziva by měly splňovat požadavky na zdravotní a ekologickou nezávadnost. Ne všechna technologicky a ekonomicky vhodná abraziva tyto požadavky splňují.
  - Recyklovatelnost – možnost opětovného použití abraziva snižuje provozní náklady.
- [4]

### 3.3 Obrobitelnost materiálu

U konvenčních metod obrábění, mezi které patří frézování, soustružení, vrtání a podobně je obrobitelnost a její hodnocení velmi propracovaná záležitost. A je mnoho metod k jejímu vyhodnocení. Zatímco u hodnocení obrobitelnosti materiálů je využívána metoda popsaná autory Zeng a Kim z roku 1993. Velkou nevýhodou této metody hodnocení obrobitelnosti materiálu je pro výpočet potřeba subjektivního hodnocení povrchu materiálů vytvořených technologií vodního paprsku. Dále není definován, jako u konvenčních technologií obrábění, etalonový materiál potřebný ke srovnání naměřených a vypočtených hodnot. [7]

### 3.4 Kvalita povrchu

Samotné hodnocení kvality povrchu potřebné pro výpočet obrobiteľnosti materiálů metodou navrženou autory Zeng a Kim spočívá v rozdělení vzniklého povrchu do 5 stupňů kvality  $q$  (viz. Obr.6). Tato metodika určení kvality povrchu byla navržena stejnými autory. Kde  $q=1$  je nejhorší možná kvalita řezu, vznikající převážně při dělicím řezu a  $q = 5$  je nejlepší. [17] Díky své jednoduchosti je toto hodnocení využíváno ve světě mnohými firmami. Vzhledem k subjektivnímu hodnocení vzniklého povrchu dochází k rozdílným hodnocením kvality povrchu mezi různými firmami.



Obr. 6 Porovnání povrchů vytvořených vodním paprskem[6]

### 3.5 Postup zkoušky obrobitelnosti u hydroabrazivního dělení

Postup zkoušky obrobitelnosti u hydroabrazivního dělení lze rozepsat do následujících kroků [7]:

1. Změříme hmotnost  $m_1$  testovaného materiálu s přesností nejlépe  $\pm 0,01$  g. Testovaný materiál by měl být řádně vysušen.
2. Na základě geometrických rozměrů zkoušeného vzorku určíme jeho objem  $V$  s přesností  $\pm 5\%$ .
3. Pomocí vztahu (1) určíme měrnou hmotnost  $\rho$  zkoušeného materiálu

$$\rho = \frac{m_1}{V} \quad (1)$$

Pozn.: v případě, že měrnou hmotnost  $\rho$  známe, lze krok 2 a krok 3 vynechat.

4. Na testovaném materiálu provedeme zkušební řez, který vytvoří v materiálu drážku. Takto vytvořená drážka představuje odebrané množství materiálu. Při vytvoření drážky nesmí dojít k prořezání celé tloušťky materiálu.
5. Po vytvoření drážky je nutné zkoušený vzorek osušit proudem vzduchu. V případě nasákavých materiálů (jako jsou různé geomateriály) je nutné vzorek vysušit v peci.
6. Změříme konečnou hmotnost  $m_2$  testovaného materiálu.
7. Určíme hmotnostní úběr materiálu  $\Delta m$  pomocí rovnice (2):

$$\Delta m = m_1 - m_2. \quad (2)$$

8. Na základě rovnice (3) určíme objemový úběr materiálu  $\Delta V$ :

$$\Delta V = \frac{\Delta m}{\rho}. \quad (3)$$

9. Dále určíme jednotkový objemový úběr materiálu  $\Delta V_U$

$$\Delta V_U = \frac{\Delta V}{L}, \quad (4)$$

kde  $L$  je délka zkušební drážky.

Pozn.: Jednotkový objemový úběr materiálu  $\Delta V_U$  lze stanovit i měřením geometrických rozměrů drážky, pomocí optického profilometru.

10. Pokud známe jednotkový objemový úběr materiálu  $\Delta V_U$ , lze stanovit index obrobiteľnosti  $M_I$  ve tvaru:

$$M_I = \frac{\Delta V_U}{\Delta V_{Uet}}, \quad (5)$$

,kde  $\Delta V_{Uet}$  je jednotkový objemový úběr etalonového materiálu. [7]

## 4 Experimentální část

### 4.1 Nastavení experimentu

K experimentu bylo použito zařízení nacházející se na Ústavu geoniky AV ČR. Samotné zařízení bylo složeno z vysokotlakého čerpadla PTV 75-60 92x. Maximální pracovní tlak je 415 MPa, maximální průtok je  $7,8 \text{ l} \cdot \text{min}^{-1}$  a příkon zařízení je 67 kW. Dále řezacím stolem X-Y PTV WJ2020-1Z-D sloužícím k zajištění pohybu řezné hlavy o rozměrech pracovní plochy  $2000 \times 2000 \text{ mm}$  a s rychlostí posuvu nastavitelnou v rozmezí  $0\text{-}20 \text{ m} \cdot \text{min}^{-1}$ .

Tab. 1 Technologické parametry

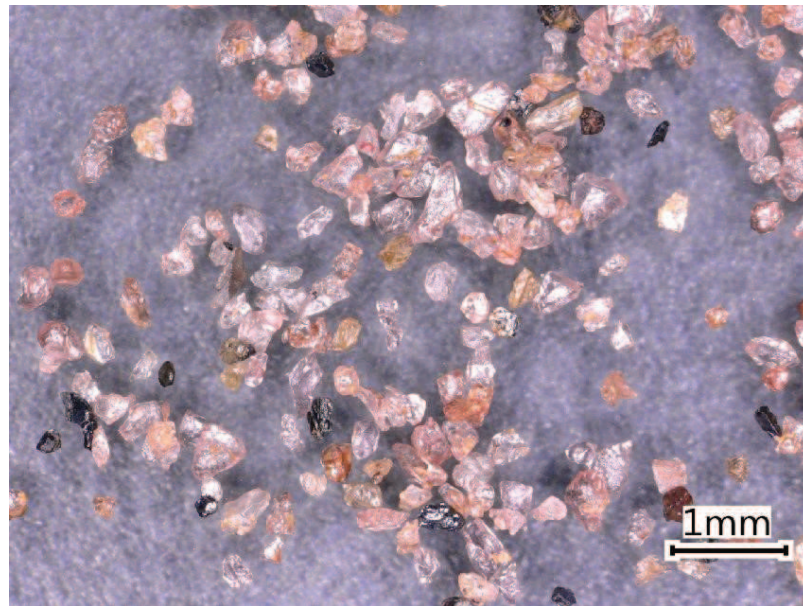
Technologické parametry	Hodnota
Tlak $p$	400 MPa
Úhel dopadu $\varphi$	$90^\circ$
Materiál abraziva	indický granát
Velikost abraziva	80 MESH
Hmotnostní průtok abraziva $m_a$	$400 \text{ g} \cdot \text{min}^{-1}$
Rychlost posuvu	$1000 \text{ m} \cdot \text{min}^{-1}$



Obr. 7 Ukázka řezání vzorků



U všech materiálů byly zvoleny stejné technologické parametry (Tab. 1), které byly zvoleny v návaznosti na volbu experimentálních materiálů. Jako abrazivo sloužil u všech vzorků indický granát o zrnitosti MESH 80 (Obr. 8).



Obr. 8 Abrazivo indický granát

## 4.2 Vlastnosti zkoumaných materiálů

Pro experimentální část bakalářské práce bylo využito 6 rozdílných druhů materiálů.

### 4.2.1 Inconel 600

Jedná se o slitinu mnoha prvků, z nichž obsahově nevýznamnější jsou nikl, chrom a železo (Tab. 2 a 3). Mezi hlavní přednosti této slitiny patří vysoká pevnost a to i za vysokých teplot, dále pak velmi dobrá korozní odolnost a odolnost proti creepu. Tento materiál je využíván v automobilovém průmyslu, kde se používá pro výrobu součástí do motorů automobilů, v jaderné energetice, letectví a pro výrobu tlakových nádob.

Tab. 2 Mechanické vlastnosti testovaného vzorku Inconel 600

Rm [MPa]	Rp [MPa]	A [%]
725- 1035	550-800	10-30

Tab. 3 Chemické složení testovaného vzorku Inconel 600

Ni [%]	Cr [%]	Fe [%]	Mo [%]	Ti [%]	Al [%]	Mn [%]	Cu [%]	Si [%]	C [%]	S [%]
72,00	14,00-17,00	6,00-10,00	–	–	–	1,00	0,50	0,50	0,15	0,015



Obr. 9 Vzorek z materiálu Inconel 600

#### 4.2.2 Nástrojová ocel

**CPM – REX** – Díky vysokému obsahu vanadu, wolframu a kobaltu se tato nástrojová ocel vyznačuje vysokou otěruvzdorností, tvrdostí a tvrdostí za tepla (Tab. 4 a 5). Při výrobě je výhodná zvláště pro možnost zvýšení řezné rychlosti při obrábění za sucha.



Obr. 10 Vzorek z materiálu CPM-REX

Tab. 4 Mechanické vlastnosti testovaného vzorku

<b>R<sub>m</sub></b> <b>[MPa]</b>	<b>R<sub>p</sub></b> <b>[MPa]</b>	<b>A</b> <b>[%]</b>
720	n/a	n/a

Tab. 5 Chemické složení testovaného vzorku

<b>C</b> <b>[%]</b>	<b>Si</b> <b>[%]</b>	<b>Mn</b> <b>[%]</b>	<b>Cr</b> <b>[%]</b>	<b>V</b> <b>[%]</b>	<b>Mo</b> <b>[%]</b>	<b>S</b> <b>[%]</b>	<b>W</b> <b>[%]</b>	<b>Co</b> <b>[%]</b>
3,4	–	–	4,00	9,50	5,00	–	10,00	9,00

#### 4.2.3 Nerezová ocel

**AISI304** – Jedná se o slitinuchromu niklu a železa, vyznačující se vysokou odolností proti korozi (Tab. 6 a 7). Svou odolností proti vodní páře, vodě, vlhkostí vzduchu a slabým kyselinám je výhodnou při využití v mnoha oblastech např. v potravinářském, farmaceutickém a kosmetickém průmyslu. Využívá se při výrobě nástrojů pro domácnost, při stavbě chemických zařízení nebo i při výrobě chirurgických nástrojů.



Obr. 11 Vzorek z materiálu AISI 304

Tab. 6 Mechanické vlastnosti testovaného vzorku

<b>R<sub>m</sub></b> <b>[MPa]</b>	<b>R<sub>p</sub></b> <b>[MPa]</b>	<b>A</b> <b>[%]</b>
1100	760	10

Tab. 7 Chemické složení testovaného vzorku

C[%]	Si [%]	Mn [%]	P [%]	S [%]	N [%]	Cr [%]	Ni [%]
0,07	1,00	2,00	0,045	0,030	0,11	17,00-19,50	8,00-10,50

#### 4.2.4 Měď

**EN CW 004A** – Měď je převážně využívána v elektrotechnice a při výrobě elektrických zařízení a to z důvodů její velmi dobré elektrické a tepelné vodivosti. Na vzduchu při působení atmosférické vlhkosti a oxidu uhličitého vzniká na povrchu mědi tenká vrstva uhličitanu měďnatého, typicky se vyznačující svou nazelenalou barvou. Tato pokrývka chrání materiál před hloubkovou oxidací, čímž zvyšuje její korozivzdornost. Využívá se pro výrobu okapů a střešních krytin, dále pak na trubice pro rozvod plynů a v elektrotechnice. Chemické a mechanické vlastnosti materiálu jsou uvedeny v tabulkách 8 a 9.



Obr. 12Vzorek z materiálu EN CW 004A

Tab. 8 Mechanické vlastnosti testovaného vzorku

Rm [MPa]	Rp [MPa]	A [%]
240-300	n/a	8-15

Tab. 9 Chemické složení testovaného vzorku

Cu[%]	O [%]	Pb[%]	Bi[%]
99,9	max. 0,04	max. 0,005	max. 0,0005

#### 4.2.5 Mosaz

**CW 614N** – Mosaz je slitina mědi a zinku, která se vyznačuje svou zlatavou barvou (Tab. 10 a 11). Její výhodou jsou dobré vlastnosti při práci za nízkých teplot. Využívá se při sériových výrobách armatur, šroubů a dalších výrobků.



Obr. 13 Vzorok z materiálu CW 614N

Tab. 10 Mechanické vlastnosti testovaného vzorku

R <sub>m</sub> [MPa]	R <sub>p</sub> [MPa]	A [%]
430	250	12

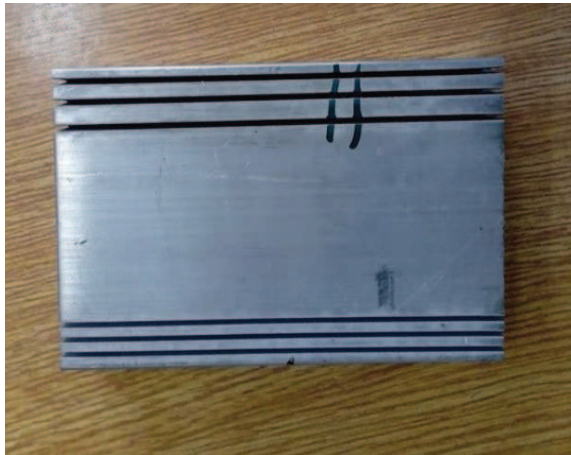
Tab. 11 Chemické složení testovaného vzorku

Cu[%]	Zn[%]	Pb[%]	Al [%]	Fe[%]	Ni [%]	Sn[%]	Jiné[%]
57,00-59,00	zbytek	1,6-2,5	0,05	0,3	0,3	0,3	0,2

#### 4.2.6 Hliník

**EN AW 6060** – Hliník je pro své vlastnosti jeden z nejpoužívanějších konstrukčních kovů, vyznačuje se svou dobrou korozní odolností a vysokou tvárností. Pro experimentální část bakalářské práce byla vybrána slitina hliníku EN AW 6060. Tato slitina má dobrou korozivzdornost, tvárnost a vysokou leštitelnost. Využívá se pro výrobu částí zařízení, která pracují dlouhodobě při teplotách 50 až – 70 °C. Lze se s ním tedy setkat v pilotních kabinách letadel, v automobilech, dále pak ve stavebnictví nebo potravinářském průmyslu. Jeho mechanické a chemické vlastnosti jsou v tabulkách (12 a 13).





Obr. 14Vzorek z materiálu EN AW 6060

Tab. 12Mechanické vlastnosti testovaného vzorku

<b>Rm</b> [MPa]	<b>Rp</b> [MPa]	<b>A</b> [%]
120-190	60-150	16

Tab. 13Chemické složení testovaného vzorku

<b>Si[%]</b>	<b>Fe[%]</b>	<b>Cu[%]</b>	<b>Mn[%]</b>	<b>Mg [%]</b>	<b>Cr[%]</b>	<b>Zn[%]</b>	<b>Ti[%]</b>
0,3-0,6	0,1-0,3	0,1	0,1	0,35-0,6	0,05	0,15	0,1

### 4.3 Postup výpočtu

Pro popis výpočtu obrobitelnosti materiálu zvolenou metodou popsanou výše byl zvolen materiál AISI 304, který je také referenčním materiálem.

Vysušený materiál byl nejprve zvážen na váze EW3000 – 2M. Původní váha materiálu  $m_I$  byla v tomto případě 659.46 g.

Na základě naměřených rozměrů vzorku vytvořeného technologií AWJ, byl vypočten jeho objem  $V = 84145.956 \text{ mm}^3$ .

Dalším krokem pro výpočet obrobitelnosti bylo zjištění měrné hmotnosti  $\rho$ , která byla získána pomocí vzorce (1).

$$\rho = \frac{659,46}{84145,956}$$

$$\rho = 0,008 \text{ g} \cdot \text{mm}^3$$

Následně byla na vzorku vytvořena pomocí technologie AWJ drážka. V případě zvolených experimentálních materiálů byly vytvořeny 3 drážky. Při volbě parametru se muselo dbát na to, aby nedošlo k prořezání materiálu. Zvolené parametry jsou zapsány v tabulce Tab.14. Po vyřezání potřebné drážky byl materiál vysušen a podruhé zvážen. V případě AISI 304 byla váha  $m_2 = 650,11$  g.

Pomocí rovnice (2) byl určen hmotnostní úběr  $\Delta m$ , jenž byl následně přepočten na hmotnostní úběr pro jednu drážku.

$$\Delta m = \frac{659,46 - 650,11}{3}$$

$$\Delta m = 3,117 \text{ g.}$$

Na základě vzorce (3) následovalo určení objemového úběru materiálu.

$$\Delta V = \frac{3,117}{0,008}$$

$$\Delta V = 398,681 \text{ mm}^3$$

Který posloužil k následnému výpočtu jednotkového objemového úběru, vypočteného ze vztahu (4), kde L představuje délku zkušební drážky.

$$V_U = \frac{398,681}{100,2}$$

$$\Delta V_U = 3,969 \text{ mm}^3$$

Po zjištění jednotkového objemového úběru materiálu byl podle vzorce (5) určen index obrobiteľnosti daného materiálu.  $\Delta V_{Uet}$  představuje objemový úběr etalonového materiálu.

$$M_I = \frac{3,969}{3,969}$$

$$M_I = 1$$

Vzhledem k tomu, že etalonový materiál a materiál zvolený k popisu postupu výpočtu je u obou případů AISI 304 je jeho index obrobiteľnosti  $M_i = 1$ .

#### 4.4 Diskuze a výsledky

Pro samotný experiment bylo pomocí technologie AWJ nařezáno 6 různých vzorků (Obr. 9, 10, 11, 12, 13, a 14), jejichž rozměry byly naměřeny a zapsány. Z naměřených hodnot byl následně vypočten objem jednotlivých vzorků, potřebný ke stanovení koeficientu obrobitelnosti srovnávaných materiálů. Po očištění od zbytků abraziva byl materiál nechán vyschnout a došlo k jeho následnému zvážení. (Obr. 15)



Obr. 15 Vážení vzorku

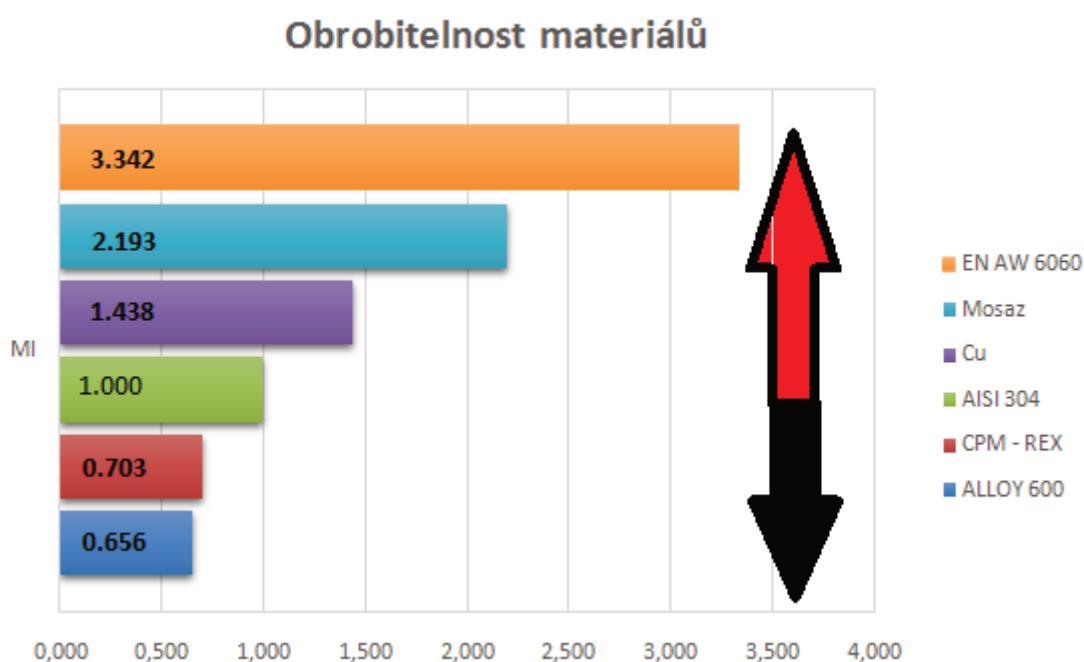
Pomocí metody AWJ byl na vzorcích proveden v rámci experimentu úběr materiálu. Nastavené parametry stroje byly pro každý zkušební vzorek stejné. Po úběru materiálu vytvořením drážky pomocí technologie AWJ byl materiál opět opláchnut od zbytkového abraziva a následně usušen. Následovalo kontrolní měření potřebné k určení hmotnostního úběru materiálu.



Po zjištění hmotnostního úběru, došlo k vypočtení dalších hodnot potřebných k určení indexu obrobitelnosti materiálu. V tabulce 14 jsou zapsány naměřené a vypočtené hodnoty potřebné pro stanovení indexu obrobitelnosti. Postup výpočtu je uveden v kapitole 4.3.

Tab. 14 Naměřené a vypočtené hodnoty potřebné pro stanovení indexu obrobitelnosti

Materiál	$m_1$ [g]	$m_2$ [g]	Objem [mm <sup>3</sup> ]	$\Delta m$ [g]	$\rho$ [g/mm <sup>3</sup> ]	$\Delta V$ [mm <sup>3</sup> ]	$\Delta V_U$ [mm <sup>3</sup> ]	$M_I$
Inconel 600	167,47	158,4	14790,816	1,512	0,011	133,509	2,603	0,656
CPM - REX	699,50	692,11	79360,404	2,463	0,009	279,473	2,789	0,703
AISI 304	659,46	650,11	84145,956	3,117	0,008	397,681	3,969	1,000
Cu	884,43	869,26	98901,800	5,057	0,009	565,464	5,706	1,438
Mosaz	629,70	607,73	74775,150	7,323	0,008	869,626	8,705	2,193
EN AW 6060	310,73	300,41	119440,600	3,440	0,003	1322,292	13,263	3,342



Obr. 16 Grafické znázornění vypočítané obrobitelnosti zkoumaných materiálů

Na obrázku 16 je vidět srovnání vypočtených hodnot indexu obrobitelnosti všech šesti testovaných materiálů. Index obrobitelnosti je u referenčního materiálu AISI 304 1,000, od kterého se odvíjí srovnání dalších materiálů. Materiály s vyšší hodnotou indexu jsou hůře obrobitelné než materiály s hodnotou nižší.

Cílem experimentu byl výpočet a srovnání obrobiteľnosti materiálů za použití metody abrazivního vodního paprsku. Ke zjištění potřebných hodnot bylo využito šest různých materiálů s různými mechanickými vlastnostmi. V průběhu experimentu byla vypočtena obrobiteľnost všech materiálů. Výsledná data byly zapsána do tabulky (Tab. 14) a následně srovnána graficky na obrázku 16. Z tohoto grafu lze vyčíst, které materiály jsou lépe obrobitelné a které naopak hůře.

## 5. Závěr

Cílem bakalářské práce bylo experimentální ověření obrobitelnosti materiálů při použití technologie abrazivního vodního paprsku. V teoretické části bakalářské práce jsou shrnuty poznatky o technologiích vodního paprsku a dále pak možnosti určení obrobitelnosti materiálu výše zmíněnou technologií. Je popsán výpočet obrobitelnosti materiálů obrobených technologií abrazivního vodního paprsku.

Experimentální část zahrnuje přípravu vzorků potřebných pro provedení experimentu, jejich zvážení a srovnání do tabulky. Popis technologických parametrů stroje zvolených při následném pokusu. Z výsledných hodnot byl pomocí určené metody pro výpočet obrobitelnosti dopočten index obrobitelnosti vybraných materiálů.

Vlastní přínos bakalářské práce spočívá ve stanovení obrobitelnosti u vybraných materiálů obrobených technologií AWJ, kdy etalonovým materiálem zvoleným k porovnání vzorků byl vybrán materiál AISI 304. Z výsledných hodnot je patrné, že měkký kov, jako slitina hliníku EN AW 6060, má lepší obrobitelnost než houževnatý kov Inconel 600, který je při stejných technologických parametrech obrobitelný mnohem hůře.

## 6. Literatura

- [1] SUMMERS, D.A. *Waterjetting Technology*. Oxford, 1995, 882 s. ISBN 0-419-19660-9.
- [2] MOMBER, W.A., KOVACEVIC, R. Principles of Abrasive Water Jet Machining. In: Springer Science & Business Media, 2012, *Technology & Engineering*, 394 s. ISBN 978-1-4471-1574-8.
- [3] KRAJNÝ, Z. *Vodný lúč v praxi - WJM*. Bratislava: Miroslav Mračko, 2001, 384 s. ISBN 80-8057-091-4.
- [4] VAŠEK, J., MARTINEC, P., FOLDYNA, J., SITEK, L., ŠČUČKA, J. *Abrasives for AWJ cutting*. Academy of Sciences, Ostrava, 2002.
- [5] HASHISH, M. An Investigation of Milling With Abrasive-Waterjets. *ASME of Engineering for Industry*, vol. 111, 1989, pp. 158-166.
- [6] SITEK, L., FOLDYNA, J., ŠVEHLA, B. Vodní paprsek ve strojírenství. [Water jet in mechanical engineering.] *Strojárstvo - strojírenství*. Roč. 8, č. 5, 2004, pp. 100-101, ISSN 1335-2938.
- [7] HLAVÁČEK, Petr. *Studium topografie povrchů vytvořených hydroabrazivním dělením ve vztahu k fyzikálně-mechanickým vlastnostem materiálu* [online]. Ostrava, 2012 [cit. 2018-05-18]. Dostupné z: <http://hdl.handle.net/10084/96289>. Disertační práce. Vysoká škola báňská - Technická univerzita Ostrava
- [8] ZELENÁK, Michal. *Měření a analýza nerovností povrchů vytvořených hydroabrazivním a laserovým dělením z hlediska materiálu a mechanismu desintegrace* [online]. Ostrava, 2012 [cit. 2018-05-18]. Dostupné z: <http://hdl.handle.net/10084/96295>. Disertační práce. Vysoká škola báňská - Technická univerzita Ostrava.
- [9] CHROBÁK, Ladislav. *Kvalita řezných ploch vybraných technických materiálů po aplikaci vysokorychlostního abrazivního vodního paprsku* [online]. Ostrava, 2016 [cit. 2018-05-18]. Dostupné z: <http://hdl.handle.net/10084/114959>. Diplomová práce. Vysoká škola báňská - Technická univerzita Ostrava.

- [10] PEREC A. Abrasive suspension water jet cutting optimization using orthogonal array design, *Procedia Engineering*, vol. 149, 2016, pp. 366-373
- [11] JERMAN, M., ORBANIC, H., LEBAR, A., SABOTIN, I., DREŠAR, P., VALENTINČIČ, J. Measuring the water temperature changes in Ice abrasive water jet prototype. *Procedia Engineering*, 149, 2016, pp. 163-168.
- [12] FOLDYNA, J. Ultrazvuková modulace vysokorychlostních vodních paprsků. *Kandidátská disertační práce*. Akademie věd České republiky, Ústav geoniky Ostrava, 1996, 67 s., přílohy 29 s.
- [13] VIJAY, M. M. 1992. Ultrasonically generated cavitating orinter rupted jet, U. S. Patent No. 5,154,347.
- [14] VIJAY, M. M., FOLDYNA, J., REMISZ, J. Ultrasonic Modulation of High-Speed Water Jets. *Geomechanics 93*, Proceedings of the International Conference Geomechanics 93. Rotterdam, Editor A. A. Balkema Publisher, 1994, pp. 327-332.
- [15] BRUNTON, J., H. High Speed Liquid Impact. Philosophical Transactions of the Royal Society of London. Series A, *Mathematical and Physical Sciences*, vol. 260, no. 1110, 1966, pp. 79-85.
- [16] FOLDYNA, J., SITEK, L., SCUCCA, J., MARTINEC, P., VALICEK, J., PALENIKOVA, K. Effects of Pulzating Water Jet Impact on Aluminium Surface. *Journal of Materials Processing Technology*, vol. 209, no. 20, 2009, pp. 6174-6180.
- [17] ZENG, J., KIM, T. J., Parameter prediction and cost analysis in abrasive water jet cutting operations. *Proc. 7<sup>th</sup> American water jet conference*, U.S.A: Washington, August 28-31, 1993, pp. 175-189, ISBN 1-880342-02-2.
- [18] Technical Specifications of AISI 304 [online], [cit. 2018-05-20]. Dostupné z: <http://www.gstyle.com/en/download/AISI304.pdf>
- [19] EGM Group [online], [cit. 2018-04-20]. Dostupné z: [http://egmgroup.it/vedit/15/img\\_prodotti/schede/Cu-ETP\\_2013ENG-12.05.21.pdf](http://egmgroup.it/vedit/15/img_prodotti/schede/Cu-ETP_2013ENG-12.05.21.pdf)

- [20] Aluminium Alloy EN-AW 6060 [online], [cit. 2018-05-20]. Dostupné z: [http://www.aluminco.com/media/155961/ALUMINIUM-ALLOY-EN-AW-6060\\_MATERIAL-DATA-SHEET\\_ALUMINCO.pdf](http://www.aluminco.com/media/155961/ALUMINIUM-ALLOY-EN-AW-6060_MATERIAL-DATA-SHEET_ALUMINCO.pdf)
  
- [21] Material data sheet CW614N[online], [cit. 2018-04-20]. Dostupné z: [https://seeberger.net/\\_assets/pdf/werkstoffe/messing/en/CW614N](https://seeberger.net/_assets/pdf/werkstoffe/messing/en/CW614N)
  
- [22] Special Metals [online], [cit. 2018-04-20]. Dostupné z: <http://www.specialmetal.swiggin.co.uk/pdfs/products/INCONEL%20alloy%20600.pdf>
  
- [23] NÁSTROJOVÁ OCEL CPM® REX 121 [online], [cit. 2018-04-20]. Dostupné z: [http://www.bolzano.cz/assets/files/NO/Nove\\_NO/Materialove\\_listy/mater\\_listy\\_pras\\_metalur/CPMRex121.pdf](http://www.bolzano.cz/assets/files/NO/Nove_NO/Materialove_listy/mater_listy_pras_metalur/CPMRex121.pdf)

## **7. Přílohy**

**Příloha č. 1 Materiálový list – nerezová ocel AISI 304**

**Příloha č. 2 Materiálový list – měď EN CW004A**

**Příloha č. 3 Materiálový list – slitina hliníku EN AW 6060**

**Příloha č. 4 Materiálový list – mosaz CW 614N**

**Příloha č. 5 Materiálový list – Inconel 600**

**Příloha č. 6 Materiálový list – nástrojová ocel CPM REX 121**

## Příloha č. 1 Materiálový list pro nerezovou ocel AISI 304



## Technical Specifications of AISI304

<b>Material Description</b>	Stainless Steel DIN 1.4301
<b>DIN Specifications</b>	DIN 1.4301, DIN 2463, DIN 17451
<b>Specifications Equity</b>	AISI 304, UNS S30400

## Composition % per weight

Element	%	Notes
C	Max 0.08	
Cr	18 – 20	
Ni	8 – 10.5	
Fe	66.345 – 74	
Mn	Max 2	
P	Max 0.045	
S	Max 0.03	
Si	Max 1	

## Physical Properties

Description	Value	Notes
Density	8 gr/cm <sup>3</sup>	
Hardness	29 HRC	
Hardness (annealed)	82 HRB	1100 °C, Cool rapidly

## Mechanical Properties

Description	Value	Notes
Elastic Modulus	197 GPa	
Elongation % (break point)	70%	At 50 mm
Shear Modulus	86 GPa	

## Main Characteristics

In atmospheric conditions stainless steel DIN 1.4301 has excellent resistance in rusting even with the presence of acids like nitric acid. The material has excellent resistance in alkaline solutions as well as organic and inorganic salts. In general this material is highly resistant to corrosion in atmosphere while in high salt spray like marine environment it might develop superficial staining which might be prevented with cleaning.

## G-Style S.A. – Engineering Department

Our policy is to continuously improve and develop our products. Therefore, any photo, drawing or technical specification is indicative and may be altered without any previous notice.



## Příloha č.2 Materiálový list – měď EN CW004A

EGM		EREDI GNUTTI METALLI GROUP		Cu-ETP Cu-ETP - CW004A							
INTERNATIONAL STANDARD											
EGM Group Standard	EN	CEN	ASTM (CDA)	AFNOR	BS	JIS					
EGMR02	Cu-ETP	CW004A	C11000	Cu-a1	C101	C1100					
APPLICATION											
Industrial rolled products											
Electric and Electronic	lugs, connectors, terminals, lamp holder, plugs, relais, pins, multi-plug, multi-plug.										
Automotive	car parts, radiator tanks, connectors, clamp.										
Mechanical	shearing, small parts, connectors, household appliance, eyelets.										
Transformers	Transformers										
Fashion	eyelets, zip, buttons, fastener, clasp.										
Building products											
Other	bath accessories, shower hose, handle, chandelier, profiles, medals, cups, chain beads.										
PROPERTIES											
Shearing	☆☆										
Deep drawing	☆☆☆☆										
Surface treatment	☆☆☆☆										
Welding	☆☆☆☆										
Bending	☆☆☆☆										
PHYSICAL PROPERTIES											
EGM Group Standard	DENSITY [g/cm³]	ELECTRICAL CONDUCTIVITY [MS/m]	ELECTRICAL CONDUCTIVITY [IACS]	THERMAL CONDUCTIVITY [W/(m•K)]							
EGMR02	8,91	min. 55	min. 100	min. 390							
CHEMICAL COMPOSITION											
EGM Group Standard	EN / CEN	%	Cu	Bi	O	P	Pb	-	-	Σ Other	
EGMR02	Cu-ETP CW024A	min. max.	99,90 -	- 0,0005	- 0,04	- -	- 0,005	- -	- -	- 0,03	
MECHANICAL PROPERTIES											
EGMR02 Cu-ETP - CW004A	Designation	TENSILE STRENGHT		ELONGATION		HARDNESS		GRAIN			
		Rm (N/mm²)		A50mm % thickness ≤2,5 mm	A5% thickness >2,5 mm	HV		mm			
		min.	max.	min.	min.	min.	max	min.	max		
	R220	220	260	33	42	-	-	-	-	-	
	H040	-	-	-	-	40	65	-	-	-	
	R240	240	300	8	15	-	-	-	-	-	
	H065	-	-	-	-	65	95	-	-	-	
	R290	290	360	4	6	-	-	-	-	-	
	H090	-	-	-	-	90	110	-	-	-	
	R360	360	-	2	-	-	-	-	-	-	
H110	-	-	-	-	110	-	-	-	-		

## Příloha č.3 Materiálový list – slitina hliníku EN AW 6060

ALUMINIUM ALLOY **EN-AW 6060** (AlMgSi0,5)

Material data sheet

## Scope

Aluminium alloy 6060 is a medium strength heat treatable alloy with a strength slightly lower than 6005A. It has very good corrosion resistance, very good weldability and good cold formability. It is commonly used for complex cross sections and has very good anodizing response.

Alloy	Forms	Characteristics - Properties	Applications
EN - AW 6060	• Extruded round rod/bar	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Very good corrosion resistance</li> <li>• Medium strength</li> <li>• Complex sections</li> <li>• Anodising quality</li> </ul>	Architectural sections, frames, lightings, railing, ladders, furniture, fences, flooring

Alloy	Temper	Temper designation (EN 515)
EN - AW 6060	O	Annealed wrought alloys
	T4	Solution heat treated & natural aged
	T5	Cooled from an elevated temperature forming operation & artificially aged (precipitation hardened)
	T6	Solution heat treated & artificially aged (precipitation hardened) Press quenching required
	T64	Solution heat treated & artificially aged (precipitation hardened) Under aged to improve formability (bending temper)
	T66	Cooled from an elevated temperature forming operation & artificially aged (precipitation hardened) to a higher level of mechanical properties through special control of manufacturing processes. Press quenching required.

## Chemical composition according to EN573-3 (EN - AW %)

Alloy	Si	Fe	Cu	Mn	Mg	Cr	Zn	Ti	Others		Al
									Each	Total	
6060	0,30-0,60	0,10-0,30	0,10	0,10	0,35-0,60	0,05	0,15	0,10	0,05	0,15	Rest

## Mechanical properties according to EN 755-2 extruded profiles

Alloy	Temper	Wall Thickness e mm*	Tensile strength Rm Mpa min	Proof stress R <sub>p0,2</sub> Mpa min	Elongation		Brinell Hardness HB**
					A50mm % min	A % min	
EN - AW 6060	T4	e ≤ 25	120	60	14	16	45
	T5	e ≤ 5	160	120	6	8	55
	T6	e ≤ 3	190	150	6	8	65
		3 < e ≤ 25	170	140	6	8	60
	T66	e ≤ 3	215	160	6	8	70
		3 < e ≤ 25	195	150	6	8	65

Aluminium & aluminium alloys  
Extruded rod/bar,  
tubes and precision profiles

EN 755-1	Technical conditions for inspection & delivery
EN 755-2	Mechanical properties
EN 755-3	Round bars, tolerances on dimension & form
EN 755-4	Square bars, tolerances on dimension & form
EN 755-5	Rectangular bars, tolerances on dimension & form
EN 755-6	Hexagonal bars, tolerances on dimension & form
EN 755-7	Seamless tubes, tolerances on dimension & form
EN 755-9	Profiles, tolerances on dimension & form
EN- 12020-1	Technical conditions for inspection & delivery (precision profiles)
EN- 12020-2	Tolerances on dimension & form (precision profiles)

Physical properties	
Alloys EN - AW	6060
Metallic range °C	585-650
Density g/cm <sup>3</sup>	2,70
Electrical conductivity MS/m	34-38
Thermal conductivity W/(m K)	200-220
Specific Heat J/(Kg K)	898
Thermal expansion values	
-50 to 20 °C (10 <sup>-6</sup> K)	21,8
20 to 100 °C (10 <sup>-6</sup> K)	23,4
20 to 200 °C (10 <sup>-6</sup> K)	24,5
20 to 300 °C (10 <sup>-6</sup> K)	25,6
Youngs Modulus Mpa	69500
Shear Modulus Mpa	26100

\* For different wall thicknesses of a given profile, the lowest specified values of properties shall be considered as valid for the whole profile cross-section.

\*\* The values for the HB hardness are indicative only.

## Příloha č.4 Materiálový list – mosaz CW 614N



## Material data sheet CW614N / 2.0401

## Chemical composition to DIN EN 12449

Cu %	Al %	As %	Fe %	Mn %	Ni %	Pb %	Sn %	Zn %	Others %
57,0-59,0	max. 0,05	-	max. 0,30	-	max. 0,30	2,50-3,50	max. 0,30	rest	max. 0,20

## Mechanical properties to DIN EN 12449

Temper	Wall thickness	Tensile strength	0,2 %-Proof stress		Strain	Hardness			
	$t$ mm	$R_m$ N/mm <sup>2</sup>	$R_{p0.2}$ N/mm <sup>2</sup>		$A$ %	HV	HB		
	max.	min.	min.	max.	min.	min.	max.	min.	max.
M	20	-	-	-	-	-	-	-	-
R360 <sup>1)</sup>	10	360	-	250	25	-	-	-	-
H085 <sup>1)</sup>	10	-	-	-	-	85	120	80	115
R430	10	430	250	-	12	-	-	-	-
H115	10	-	-	-	-	115	150	110	145
R500	5	500	370	-	8	-	-	-	-
H140	5	-	-	-	-	140	-	135	-

1) Annealed temper

## Příloha č.5 Materiálový list – Inconel 600

## INCONEL® alloy 600

Table 6 - Typical Mechanical-Property Ranges<sup>a</sup>

Form and Condition	Tensile Strength		Yield Strength (0.2% Offset)		Elongation, %	Hardness, Rockwell
	ksi	MPa	ksi	MPa		
Rod and Bar						
Cold-Drawn						
Annealed	80-100	550-690	25-50	170-345	55-35	65-85B
As-Drawn	105-150	725-1035	80-125	550-860	30-10	90B-30C
Hot-Finished						
Annealed	80-100	550-690	30-50	205-345	55-35	65-85B
Hot-Finished	85-120	585-830	35-90	240-620	50-30	75-95B
Plate						
Hot-Rolled						
Annealed	80-105	550-725	30-50	205-345	55-35	65-85B
As-Rolled	85-110	580-760	35-65	240-450	50-30	80-95B
Sheet						
Cold-Rolled						
Annealed	80-100	550-690	30-45	205-310	55-35	88B max.
Hard	120-150	830-1035	90-125	620-860	15-2	24C min.
Strip						
Cold-Rolled						
Annealed	80-100	550-690	30-45	205-310	55-35	84B max.
Spring Temper	145-170	1000-1170	120-160	830-1100	10-2	30C min.
Tube and Pipe						
Hot-Finished						
Hot-Finished	75-100	520-690	25-50	170-345	55-35	-
Annealed	75-100	520-690	25-50	170-345	55-35	-
Cold-Drawn						
Annealed	80-100	550-690	25-50	170-345	55-35	88B max.
Wire <sup>b</sup>						
Cold-Drawn						
Annealed	80-120	550-830	35-75	240-520	45-20	-
No. 1 Temper	105-135	725-930	70-105	480-725	35-15	-
Spring Temper	170-220	1170-1520	150-210	1035-1450	5-2	-

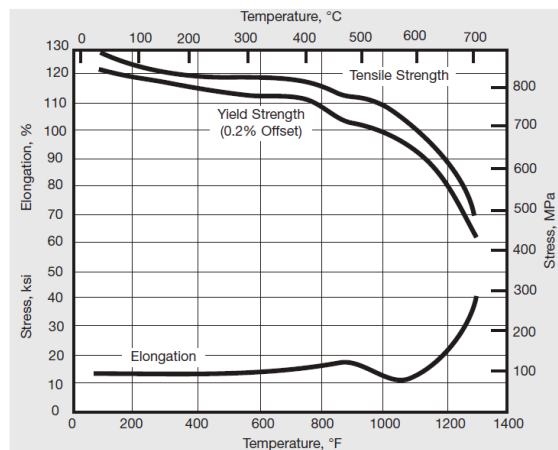
<sup>a</sup>Values shown are composites for various product sizes and therefore are not suitable for specification purposes.<sup>b</sup>Properties shown are for sizes 0.0625- to 0.250-in. (1.6 to 6.4 mm) dia. Properties for other sizes may vary from these.

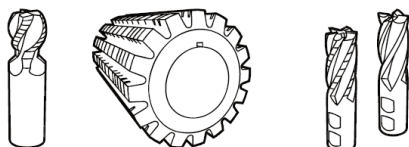
Figure 1. High-temperature tensile properties of cold-drawn bar.

## Příloha č. 6 Materiálový list – nástrojová ocel CPM REX 121

NÁSTROJOVÁ OCEL  
CPM® REX 121

CERTIFIKACE DLE ISO 9001

ZAPP

Bolzano Hochdon

## Chem. složení

C	3,40 %
Cr	4,00 %
V	9,50 %
W	10,00 %
Co	9,00 %
Mo	5,00 %

## CPM® REX 121

Je nově vyvinutá vysokovýkonná rychlořezná ocel, vyráběná společností Crucible (USA) metodou práškové metalurgie. Vyznačuje se vysokým obsahem vanadu, wolframu a kobaltu. CPM® Rex 121 je všem dosavadním rychlořezným ocelím nadřazena v otěruvzdornosti, maximální tvrdosti a tvrdosti za tepla. Z tohoto důvodu umožňuje zvýšení řezných rychlostí, což je zajímavé především při „suchém“ obrábění. CPM® Rex 121 tak představuje „most“ mezi vysoce legovanými nástrojovými ocelmi a slinutými karbidy a je proto používána v případech, kdy je požadována velmi vysoká otěruvzdornost a nasazení slinutých karbidů by bylo problematické z důvodu jejich křehkosti.

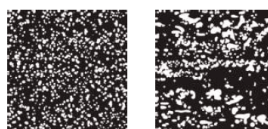
## TYPICKÉ OBLASTI POUŽITÍ

- \_ odvalovací a čepové frézy
- \_ protahovací trny
- \_ vícebřitě nástroje
- \_ nástroje s vysokými požadavky na tvrdost za tepla
- \_ nástroje pro přesné stříhání

## Fyzikální vlastnosti

Modul pružnosti E [kN/mm <sup>2</sup> ]	214
Hustota [kg/dm <sup>3</sup> ]	8,25

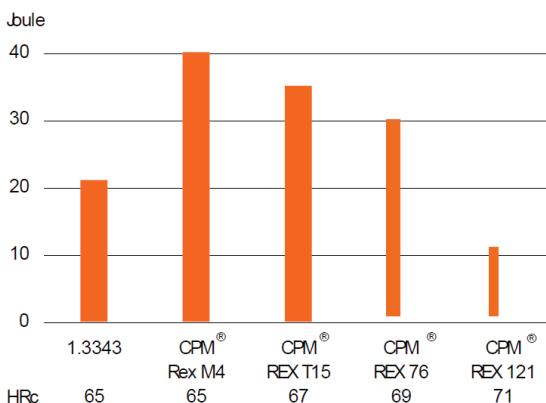
## Struktury materiálů vyrobených práškovou a konvenční metalurgií



Srovnání homogenní struktury práškovou metalurgií vyrobeného materiálu s hrubou karbidickou strukturou konvenční metalurgií vyrobené oceli.

## HOUŽEVNATOST

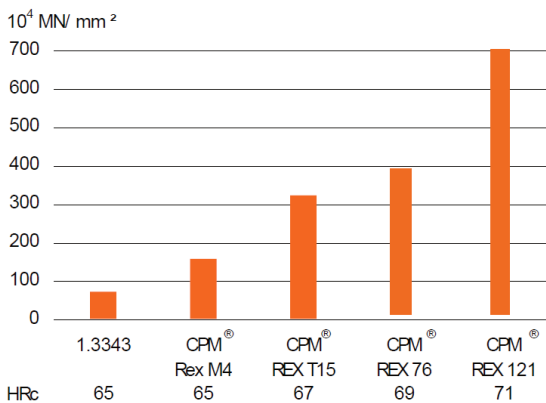
Charpy C-vrubová houževnatost



Standardní vzorek pro Charpy-test s rádiusem vrubu 12,7mm.

## OTĚRUVDORNOST

abrazivní otěruvzdornost



Reciprocně k množství při zkoušce abrazivní odolnosti obroušeného materiálu, suchý kontakt kotouče s rotujícím válcem ze slinutého karbidu.